DOI:10.11776/j.issn.1000-4939.2025.01.024

多车道宽幅悬浮隧道管体基于 CFD 的绕流特性与缩尺效应

陈志威,刘宏专,易壮鹏

(长沙理工大学土木工程学院,410114 长沙)

摘 要:为满足通行的需求悬浮隧道管体宜设计成大尺度的多车道宽幅截面,洋流是施工及运营阶段所面临的主要环境荷载。洋流作用下宽幅截面的绕流特性,以及缩尺试验或数值模拟时的尺寸效应值得重点关注。以椭圆形、圆端形、八边形 3 种按双向八车道设计的宽幅截面为对象,并以圆形截面为对照,用 CFD 软件 fluent 建立了非定常流下的二维数值模型。研究了不同形状及不同缩尺比的宽幅截面在均匀流下的复杂绕流特性,建立了各类截面升力系数幅值、阻力系数均值和力矩系数幅值与流速的关系图,获取了不同缩尺比下三分力系数的时程曲线,并在此基础上给出了稳定周期内的涡量云图。结果表明:当流速增大时,宽幅截面三分力系数变化不大,圆形截面阻力系数、升力系数则明显减小;3 种宽幅截面中,八边形升力系数、阻力系数和力矩系数均最大,脱涡频率最小,椭圆形则与之相反;各类宽幅截面不同缩尺比之间的三分力系数存在不同程度的差异,需考虑尺寸效应带来的影响;尾涡脱落对结构所受三分力有一定影响,阻力系数与涡量云图中尾涡强度、分离点有关。

关键词:悬浮隧道;多车道宽幅截面;绕流特性;三分力系数;缩尺效应;CFD 数值模拟

中图分类号:U451 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-4939(2025)01-0223-13

Flow characteristics and scale effects of multi-lane wide tube of submerged floating tunnel based on CFD

CHEN Zhiwei, LIU Hongzhuan, YI Zhuangpeng

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, 410114 Changsha, China)

Abstract: To meet the traffic demand, the tube of the submerged floating tunnel (SFT) should be designed as a large-scale multi-lane wide section. And the current is the main environmental load faced during the construction and service stages. The flow characteristics of the wide section under the action of ocean currents, as well as the scale effect in scale test or numerical simulation, deserve special attention. The two-dimensional numerical models under unsteady flow are established by using CFD software fluent, by taking the elliptical, round-end and octagonal wide sections designed according to two-way eight lanes as the ob-

收稿日期:2022-12-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52278139;52278141);湖南省自然科学基金资助项目(No. 2022JJ30612);湖南省教育厅科学研究资助项目(No. 19A004);长沙市科技计划资助项目(No. kq2202204)

通信作者:易壮鹏,教授。E-mail:yizhuangpeng@163.com

引用格式:陈志威,刘宏专,易壮鹏. 多车道宽幅悬浮隧道管体基于 CFD 的绕流特性与缩尺效应[J]. 应用力学学报,2025,42(1):223-235.
CHEN Zhiwei, LIU Hongzhuan, YI Zhuangpeng. Flow characteristics and scale effects of multi-lane wide tube of submerged floating tunnel based on CFD[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2025, 42(1):223-235.

jects, and taking the circular section as the contrast. The complex flow characteristics of wide sections with different shapes and different scale ratios under uniform flow are studied. The relationship between lift coefficient amplitude, drag coefficient mean-value, moment coefficient amplitude and flow velocity for various sections is established. The time history curves of the three component coefficient under different scale ratios are obtained. On this basis, the vorticity cloud chart in a stable period is given. The results show that the three component coefficients of wide section change little in the increasing course of the flow velocity, while the drag and lift coefficients of circular section decrease significantly. For the three wide sections, the octagonal section has the largest lift coefficient, drag coefficient and moment coefficient, but the smallest vortex shedding frequency, while the elliptical section is just the opposite. The three component coefficients for various wide sections and scale ratios have differences in different degrees, so the influence of scale effect should be considered. The wake shedding has a certain influence on the three component forces, and the drag coefficient is related to the wake strength and separation point in the vorticity cloud chart.

Key words: SFT; multi-lane wide section; flow characteristic; three-component coefficient; scale effect; CFD numerical simulation

悬浮隧道[1-2]是一种新型的悬浮于水下一定深度的超长交通结构物,利用自身重力、浮力和锚索支撑力的共同作用实现受力平衡,在超长深水海峡通道中有很好的应用前景,其流固耦合特性与结构体系的力学行为近年来受到了广泛的关注[3-6],并成为21世纪最具竞争力的跨海交通结构[7-8]。洋流是悬浮隧道施工及运营阶段面临的主要环境荷载,也是引起结构涡激响应[9-10]的主要原因。厘清洋流作用下悬浮隧道管体的绕流特性与流体作用力是研究各类流致振动的前提,而圆柱绕流问题[11-14]是研究悬浮隧道绕流特性和尺寸效应的理论基础。

圆柱绕流问题有着广泛的工程应用背景,研究者们对其进行了许多研究,方法以试验和数值模拟为主。如:梁圣召等[15]采用CFD数值模拟与试验结合的方法,研究了圆柱在不同长径比和雷诺数工况下的流动特性;陈松涛等[16]利用数值模拟探究了自由液面与自由端对典型钝体绕流的影响,结果表明自由液面与自由端的存在会显著改变流场分布;高洋洋等[17]基于CFD模拟了不同雷诺数下倾斜圆柱绕流,结果表明随着圆柱倾角的增大,圆柱尾流涡旋脱落受到明显抑制;刘闯等[18]采用大涡数值模拟了高雷诺数下圆柱尾涡模式,发现高雷诺数下圆柱绕流的尾迹变化呈现出不稳定特征;李聪洲等[19]采用改进后的延迟分离涡方法模拟了高雷诺数下圆柱与方柱的绕流形式,数值结果与试验结果吻合良好。随着圆柱绕流问题的研究越来越深入,将圆柱绕流的研究成果用于悬浮隧道截面设计和优化具有重要的理论意义和工程价值。

近年来,研究者采用基于CFD的数值模拟方法结合试验方法,对悬浮隧道的绕流现象做了许多研究。如:王长春[20]采用数值方法模拟了不同工况下洋流与悬浮隧道管段的相互作用规律,并与管段模型的试验结果进行了对比验证;秦银刚等[21]采用相似准则对悬浮隧道管体进行了节段模型试验,研究了管体受到洋流冲击时的力学特性;王广地等[22]基于RNG k-ε 湍流模型采用数值模拟方法研究了断面形状对悬浮隧道管段升力系数、阻力系数的影响规律;郭晓玲等[23]基于SST k-ω 湍流模型的雷诺平均方程,利用数值模拟方法对不同雷诺数下悬浮隧道管体的涡激振动问题进行了研究;曾繁旭等[24]采用CFD软件中Fluent建立了均匀流作用下悬浮隧道不同管体截面的运动模型,研究了结构运动行为与流场参数之间的关系。这些研究为进一步探寻悬浮隧道管体的绕流特性奠定了基础。未来悬浮隧道为满足通行的需求,管体宜设计成大尺度的多车道宽幅截面[25],相应宽幅截面的升力系数、阻力系数、力矩系数和尾涡脱落规律相对于已有研究涉及的圆形截面或小尺度截面将发生变化。同时,为获取大尺寸多车道宽幅悬浮隧道截面绕流特性,试验一般为某一特定范围雷诺数的缩尺试验,而1∶1试验难以实现。不同雷诺数对应的缩尺试验或数值模型的尺寸效应同样值得关注。

本研究以椭圆形、圆端形、八边形3种按双向八车道设计的宽幅悬浮隧道截面为对象,并以圆形截面为对照,用CFD软件Fluent建立了非定常流下的二维数值模型。建立各类截面不同缩尺比的升力系

数、阻力系数和力矩系数与流速的关系,获取三分力系数的时程曲线与稳定周期内的涡量云图。在此基础上,研究多车道宽幅悬浮隧道截面在均匀流下的绕流特性以及不同缩尺比之间的尺寸效应,以期为悬浮隧道截面设计提供参考依据。

1　研究方法

1.1　流域设置与参数

建立宽幅截面管体绕流的流场区域及参数条件如下:断面宽度设为 B,计算域入口距管体中心 $10B$,管体中心距出口 $25B$,上边界距管体中心 $10B$,下边界距管体中心 $10B$。计算域左侧设置为速度入口,右侧边界为压力出口,上下侧边界为壁面,隧道管体表面为静止壁面。模型示意图见图 1。计算模型采用四边形网格划分,断面边界层网格加密,近壁面第一层网格密度 y^+ 值小于 1。y^+ 值是无量纲化的壁面距离,使第一层网格 y^+ 值小于 1 可以使得第一层网格划分到黏性底层,化解了网格数量与大小的矛盾,避免了第一层网格高度过大造成的数值误差与不稳定。动量方程及湍流方程采用二阶迎风离散格式,求解采用 SIMPLEC 方法[24]。为进行悬浮隧道宽幅管体绕流特性与缩尺效应的初步探讨,不考虑管体本身运动的影响。描述悬浮隧道断面绕流的重要参数雷诺数 Re 和 Strouhal 数 St 为

$$Re = \frac{\rho UD}{\mu},\ St = \frac{f_V D}{U} \tag{1}$$

式中:ρ 为流体密度;U 为来流速度;D 为断面高度;f_V 为脱涡频率;μ 为动力黏性系数,取 $1.004 \times 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s}$。

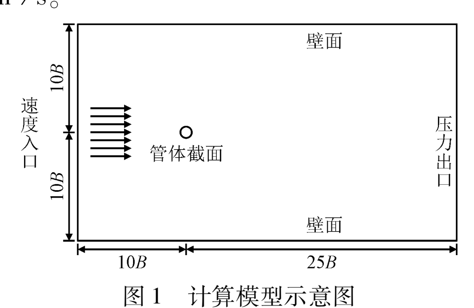


图 1　计算模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of calculation model

流体经过宽幅悬浮隧道截面时与管体之间产生的相互作用力包含 3 个部分:与来流方向垂直的分力为升力[26],来流方向的分力为阻力,合力作用点与截面形心不一致而对截面产生的扭转力矩。一般采用无量纲的三分力系数来描述截面在流体作用过程中的受力特征,其中升力系数、阻力系数、力矩系数分别定义为

$$C_{\mathrm{L}} = \frac{F_{\mathrm{L}}}{\frac{1}{2}\rho U^2 B},\ C_{\mathrm{D}} = \frac{F_{\mathrm{D}}}{\frac{1}{2}\rho U^2 D},\ C_{\mathrm{M}} = \frac{F_{\mathrm{M}}}{\frac{1}{2}\rho U^2 B^2} \tag{2}$$

式中:F_{L}、F_{D} 和 F_{M} 表示断面升力、阻力和扭矩;B 为断面宽度。三分力系数在稳定之后,升力系数和扭矩系数一般是平均值为 0 的周期曲线,阻力系数一般是平均值为某个非零值的周期曲线。因此为了进行更精确地描述,用 $C_{\mathrm{L,AM}}$ 表示升力系数幅值,$C_{\mathrm{M,AM}}$ 表示扭矩系数幅值,$\overline{C}_{\mathrm{D}}$ 表示阻力系数均值。

1.2　计算模型选择

Fluent 软件的多种湍流模型中,SST k-ω 模型在流动领域具有更高的精度和可信度,可以很好地模拟旋流、强压力梯度的边界层流动、分离流等,不包括复杂非线性黏性衰减函数,可较精确地模拟计算物体边界层,适用于外部复杂流场计算,其中湍流动能 k 和比耗散率 ω 的输运方程为[27]

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + G_k - Y_k \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega \tag{4}$$

式中:x_i、x_j 分别为平面上 2 个坐标方向;u_i、u_j 分别为流体沿 2 个方向的速度分量;G_k 为湍流动能的速度梯度;G_ω 为比耗散率的速度梯度;Γ_k 和 Γ_ω 分别表示 k 和 ω 的有效扩散率;Y_k 和 Y_ω 表示湍流耗散项;D_ω 为交叉扩散项。

1.3　截面形式选择与计算工况

考虑椭圆形、圆端形、八边形 3 种按双向八车道设计的宽幅悬浮隧道管体截面[25],并以圆形截面作为对照,各种截面形式与尺寸如图 2 所示。初始入口的流体速度 U 取 0.5 ~ 3.0 m/s 范围内的多组值,用以计算三分力系数。考虑 1∶10 和 1∶100 两种缩尺比,截面尺寸按照几何相似准则考虑。Froude 相似准则是悬浮隧道与洋流耦合作用时非常重要的相似准则,研究者们在试验研究时[24-25]一般采用 Froude 相似准则处理缩尺后的洋流速度来保证试验流场与实际流场相似,本研究中仅研究通过 Froude

相似准则处理过洋流速度后的试验流场与实际流场管体绕流特性的差别。采用 Froude 相似准则对速度进行处理,有

$$U_1 = \sqrt{\lambda} U \tag{5}$$

其中:U_1 为缩尺后来流速度;λ 为缩尺比。

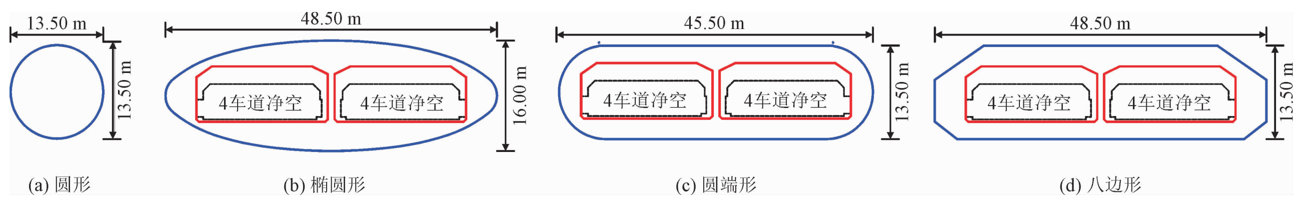


图 2 多车道宽幅悬浮隧道管体截面示意图(λ =1.0)

Fig. 2 Diagram of tube section of multi-lane wide SFT (λ =1.0)

2 数值模拟结果与分析

2.1 模型验证

为确保 CFD 数值模拟结果的有效性,消除不同参数对计算结果的不利影响,对数值模型的计算步长 Δt 与网格尺寸 d 进行无关性验证。以直径 1.35 m圆形截面超临界状态($Re = 3.5 \times 10^6$)的阻力系数时程曲线为对象,采用不同时间步长得到的阻力系数如图 3(a)所示,可以看到当 Δt 减小至 5×10^{-3} s 时已经收敛,此时阻力系数曲线与 $\Delta t = 1 \times 10^{-3}$、$5 \times 10^{-4}$ s 时非常吻合。

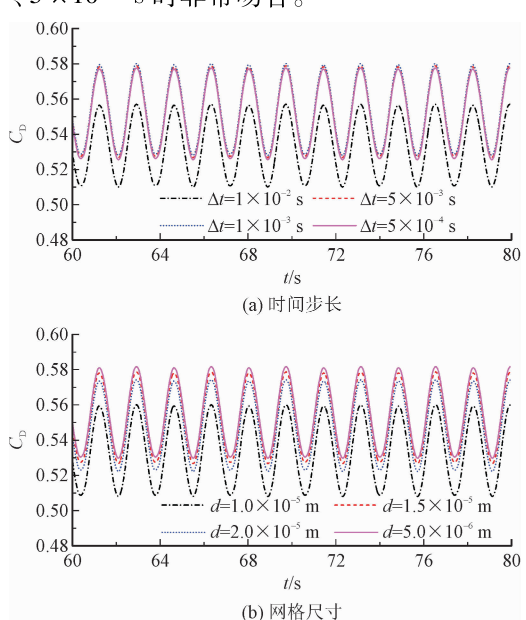
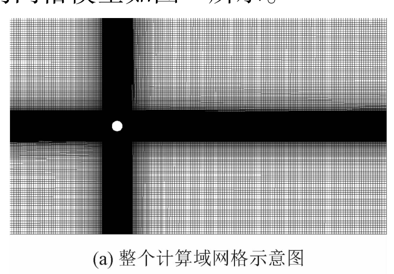


图 3 不同计算参数时的阻力系数时程曲线

Fig. 2 Time history of drag coefficient for different calculation parameters

保持其他参数不变,选用不同的截面边界层第一层网格尺寸 d,计算所得结果如图 3(b)所示。可知当 d 加密至 1.5×10^{-5}m 时,阻力系数时程曲线随 d 的变化已经很小,此时不同 d 值对应的时程曲线基本吻合,其均值是一致的。综合考虑计算效率与计算精度的要求,多车道宽幅悬浮隧道管体的数值模拟取值选择 $\Delta t = 5 \times 10^{-3}$ s,$d = 1.5 \times 10^{-5}$ m。另外考虑到计算精度,选用 4 套不同的网格数量进行无关性验证。网格数量为 10 512、85 751、153 042、305 212。当网格数量为 10 512 时计算结果出入较大,不予考虑。当网格数量分别为 85 751、153 042、305 212 时,阻力系数均值分别为 0.56、0.57、0.55。计算所得结果比较吻合上文中结果。网格数量为 153 042 的网格模型如图 4 所示。



(a) 整个计算域网格示意图

(b) 管体附近网格示意图

图 4 模型网格示意图

Fig. 4 Schematic diagram of model grid

为进一步验证本研究方法的数值模拟结果,选用 3 组 Re 数的圆形截面计算结果与已有文献进行对比验证。当 $Re = 2 \times 10^4$ 时,阻力系数均值为 1.27,与 FRANKE 等[28]、詹昊等[29]的计算结果 1.25、1.20 相差不超过 5%;当 $Re = 1.4 \times 10^5$时,阻力系数均值为 1.20,与 CANTWELL[30]、SCHEWE[31]的计算结果 1.23、1.18 几乎相等;当 $Re = 3.5 \times 10^6$时,阻力系数均值为 0.54,与程友良等[32]、刘二朋

等[33]、SCHLICHING[34]的计算结果 0.56、0.55、0.56 高度吻合。证明本研究计算方法的精确性及计算模型的有效性。

2.2　升力系数分析

由于悬浮隧道断面的存在改变了流场的分布与特征,在悬浮隧道管体表面流动的流体速度不同,从而导致断面上下表面产生压强差继而产生升力。不同悬浮隧道截面形式的受力特性存在差异,选取椭圆形、圆端形和八边形 3 种宽幅截面形式,并以圆形截面作为参照,图 5 给出了这些截面形式在不同缩尺比 λ 情况下的升力系数幅值 $C_{L,AM}$随流速 U_1的变化图。由图 5 可知,不同 λ 对应的圆形截面 $C_{L,AM}$均大于宽幅截面 $C_{L,AM}$,以对比圆形截面和八边形截面的 $C_{L,AM}$最大值为例,λ = 0.01(U_1 = 0.05 m/s),λ = 0.1(U_1 = 0.16 m/s)与 λ = 1(U_1 = 0.5 m/s)时圆形截面 $C_{L,AM}$ 最大值分别为八边形截面的 7.81 倍、7.06 倍与 1.61 倍。在 3 种宽幅悬浮隧道截面中,不同 λ 值对应 $C_{L,AM}$的大小均为:八边形 > 圆端形 > 椭圆形,此外,λ = 0.01、0.1 时 3 种截面形式对应的升力系数幅值接近,λ = 1 时 3 种截面形式对应的升力系数幅值则差异明显,因此 3 种缩尺比之间的尺寸效应明显,值得关注。另外,在流速 U_1 变化过程中,3 种宽幅截面升力系数的稳定性较好,即不同 λ 值时 $C_{L,AM}$随 U_1变化而变化的程度很小,相对而言圆形截面对 U_1 变化较为敏感,如 λ = 0.1 时圆形截面 $C_{L,AM}$随流速增大存在明显下降。因此,圆形截面 $C_{L,AM}$大于宽幅形截面;3 种宽幅截面中八边形 $C_{L,AM}$最大、椭圆形最小,而各类截面 $C_{L,AM}$尺寸效应明显;3 种宽幅截面流速变化过程中 $C_{L,AM}$的稳定性较好。

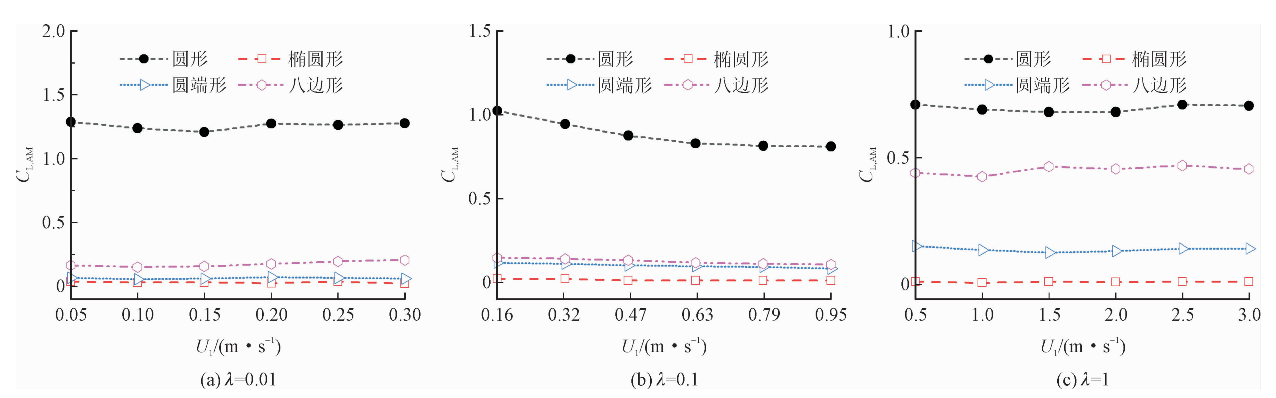


图 5　升力系数幅值随流速变化图

Fig. 5　Variation of lift coefficient amplitude with flow velocity

为了更进一步描述一定流速作用下管体升力系数 C_L随时间变化的过程,图 6 绘出了 3 种缩尺情况下最大流速对应的升力系数时程曲线。由图 6 可知,升力系数曲线均为均值为 0 的周期曲线,即升力以周期力的形式竖向作用于管体,是激发管体各类运动的主要荷载来源。同时,对比 λ = 0.01、0.1、1(对应流速 0.3、0.95、3.0 m/s)下升力系数时程曲线,可获取各类截面的尺寸效应规律。圆形截面 $C_{L,AM}$随着 λ 的增大而减小,λ = 1 时的 $C_{L,AM}$约为 λ = 0.01时的 55%;椭圆形截面 $C_{L,AM}$在 λ = 0.01 时最大,λ = 0.1、1 时约为 λ = 0.01 时的 50 %;圆端形截面 $C_{L,AM}$随着 λ 的增大而增大,在 λ = 1 时的最大值约为 λ = 0.01 时最小值的 2.3 倍;八边形截面 $C_{L,AM}$在 λ = 0.1 时最小,且最大值(λ = 1)约为其 4.3 倍。因此,采用缩尺法对宽幅截面进行数值模拟和模型试验时,升力系数随着缩尺比的不同出现一定的变化,由此产生的差别需要考虑在内。

对图 6 中的升力系数时程曲线进行傅里叶变换之后可以得到悬浮隧道截面的 *St* 数。*St* 数是描述脱涡频率的重要参数之一,通过傅里叶变换所得 *St* 数分别为:圆形截面在 λ = 0.01、0.1、1 时 *St* 数分别为 0.22、0.215、0.255。椭圆形截面分别为 0.38、0.42、0.53,圆端形截面分别为 0.28、0.27、0.26,八边形截面分别为 0.20、0.18、0.18。计算结果显示椭圆形截面 *St* 数最大、八边形截面最小。比较某一种截面不同缩尺比之间的 *St* 数发现,随着 λ 的增大,椭圆形、圆形截面的 *St* 数增大,其中椭圆形截面 λ = 1 时的 *St* 数约为 λ = 0.01 时的 1.39 倍,圆形截面 λ = 1时的 *St* 数约为 λ = 0.01 时的 1.16 倍,而圆端形、八边形截面的 *St* 数则随着 λ 增大有少许减少。

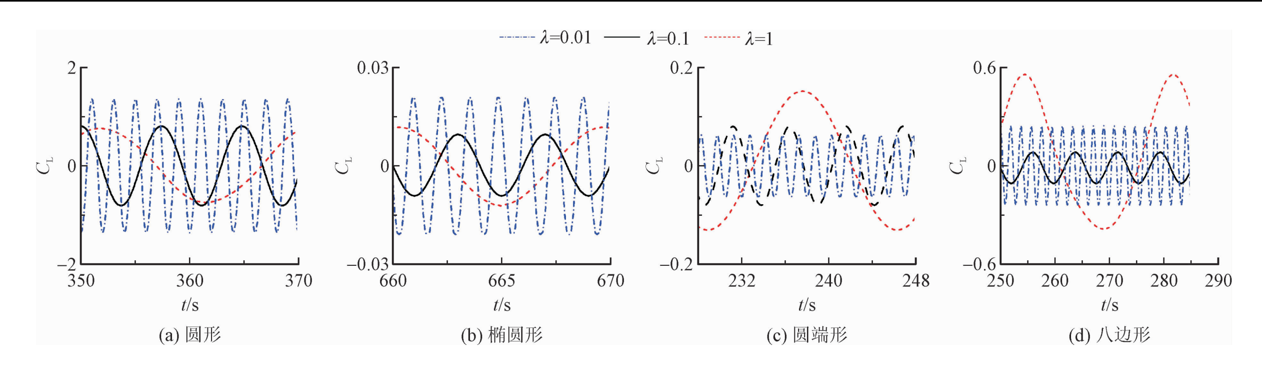


图 6 不同 λ 下升力系数时程曲线

Fig. 6 Time history of lift coefficient with different λ

2.3 阻力系数分析

处于流场中的悬浮隧道管体前后表面的压强差的面积分就是结构所受的阻力。图 7 给出了椭圆形、圆端形和八边形 3 种宽幅截面以及圆形截面在不同的缩尺比 λ 情况下的阻力系数均值 $\overline{C}_D$ 随流速 U_1 的变化图。由图 7 可知,在宽幅截面中 3 组 λ 值对应 $\overline{C}_D$ 的大小均为:八边形 > 圆端形 > 椭圆形,3 种截面形式对应的阻力系数均值在 λ =0.01 时较接近,λ =1 时差异明显,λ =0.1 时居于二者之间,3 种缩尺比之间的尺寸效应明显。此外,在流速 U_1 变化过程中,3 种宽幅截面阻力系数的稳定性较好,即不同 λ 值时 $\overline{C}_D$ 随 U_1 变化而变化的程度很小。相对而言,圆形截面在 3 种 λ 下的 $\overline{C}_D$ 变化明显且尺寸效应显著:λ =0.01 时圆形截面的 $\overline{C}_D$ 整体上大于 3 种宽幅截面,且在 U_1 变化过程中有少许下降;λ =0.1 时圆形截面的 $\overline{C}_D$ 一直大于椭圆形、圆端形截面,但随着 U_1 的增大 $\overline{C}_D$ 迅速降至小于八边形截面,减小幅度最大达到 45%;λ =1 时圆形截面的 $\overline{C}_D$ 整体上大于椭圆形、圆端形截面而小于八边形截面,且在 U_1 变化过程中减幅很小。

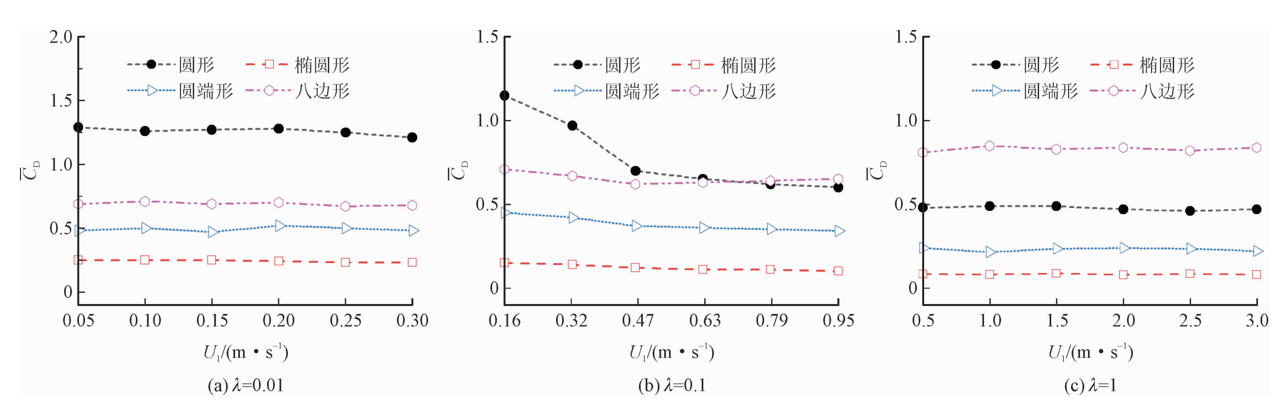


图 7 阻力系数均值随流速变化图

Fig. 7 Variation of average drag coefficient with flow velocity

图 8 给出了 3 种缩尺比分别对应流速 0.3、0.95、3.0 m/s 时各类截面的阻力系数时程曲线。由图 8 可知阻力系数曲线为均值(对应图 7 中的 $\overline{C}_D$)非零的周期曲线,其振幅随着截面形式和缩尺比大小而变。

同时,对比 λ =0.01、0.1、1 不同缩尺比下阻力系数时程曲线可发现:圆形与圆端形、椭圆形截面的阻力系数均随 λ 的增大而下降,3 种截面在 λ =1 时的阻力系数均值相对于 λ =0.01 时的值下降幅度分别为 61%、65% 和 54%;相对而言,八边形截面在 λ =1 时阻力系数均值最大,3 种缩尺比对应的 $\overline{C}_D$ 值依次为 0.68、0.65、0.84。因此,不同 λ 下的阻力系数之间存在明显的差别,在进行数值研究和模型试验时需考虑阻力系数尺寸效应带来的影响。

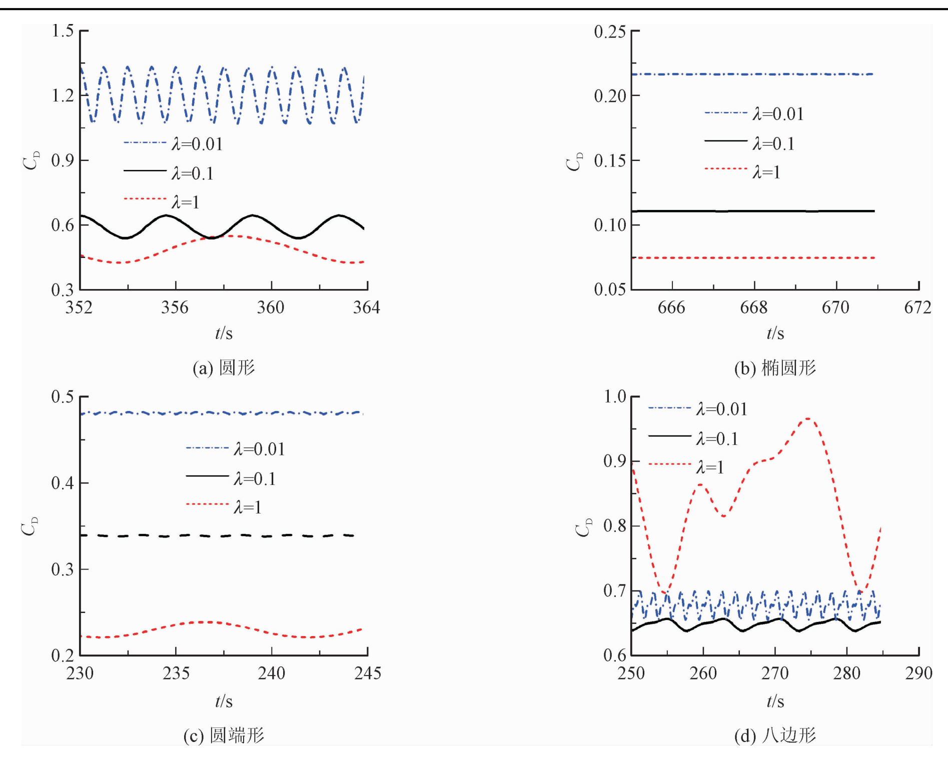


图 8　不同 λ 下阻力系数时程曲线

Fig. 8　Time history of drag coefficient with different λ

2.4　力矩系数分析

图 9 给出了 3 种缩尺比下椭圆形、圆端形、八边形及圆形截面的力矩系数幅值 $C_{M,AM}$ 随流速 U_1 的变化图。

由图 9 可知,各类截面在不同 λ 下的 $C_{M,AM}$ 随流速改变时的变化幅度较小,即不同流速作用下某类截面在固定缩尺比下的扭转力矩差别较小。此外,八边形截面的 $C_{M,AM}$ 整体上明显大于其余 3 种截面,其中圆形截面和椭圆形截面的力矩系数处于较小水平。对比 3 种 λ 对应的 $C_{M,AM}$ 变化情况发现,不同截面类型的 $C_{M,AM}$ 尺寸效应各异:圆形截面与椭圆形截面的 $C_{M,AM}$ 在不同缩尺比时其值均很小,对应的尺寸效应可忽略;圆端形截面的 $C_{M,AM}$ 随着 λ 的增大有小幅上升;八边形截面的 $C_{M,AM}$ 在不同 λ 值时差异明显,对应的尺寸效应显著。

对于悬浮隧道的宽幅截面,力矩系数增大是相对于圆形截面的一个重要特点,其本质是由于“宽幅”的结构特点导致升力、阻力的合力作用点与宽幅断面形心不一致而产生扭矩。八边形截面由于上、下不对称,这种趋势更加明显,导致 $C_{M,AM}$ 明显大于其他类型的截面。对于悬浮隧道管体而言,为满足宽幅截面的通行需求,宜采用对称设置截面等措施尽量减少扭矩,以避免可能引起的结构倾覆,同时配合上下游空间锚索等结构措施减小管体扭矩的不利影响。

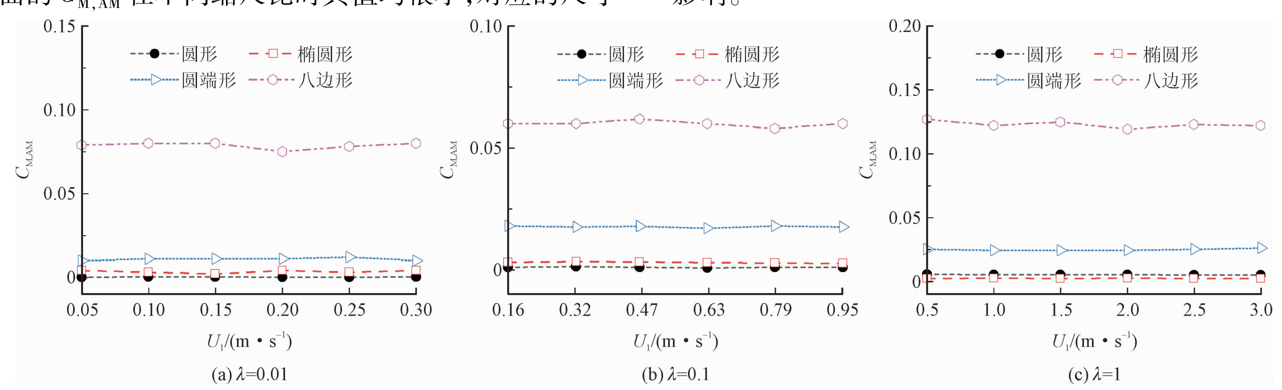


图 9　力矩系数幅值随流速变化图

Fig. 9　Variation of torque coefficient amplitude with flow velocity

图10给出了$\lambda=0.01$、0.1、1(对应流速0.3、0.95、3.0 m/s)时各类截面的力矩系数时程曲线。由图10可知,圆形、椭圆形和圆端形截面的力矩系数曲线为零均值周期曲线,八边形截面力矩系数曲线为非零均值周期曲线。对比不同截面形式和缩尺比的力矩系数曲线可发现:圆形截面的力矩系数非常小,当λ增大时力矩系数增加,$\lambda=1$时$C_{M,AM}$约为0.005;椭圆截面的力矩系数比另外2种宽幅截面(圆端形、八边形)小,且随着λ增大力矩系数稍有减小;圆端形截面的力矩系数随着λ的增大而增大,其中$\lambda=1$时$C_{M,AM}$约为$\lambda=0.01$时的1.5倍;八边形截面的力矩系数在$\lambda=1$时最大而在$\lambda=0.1$时最小,且$\lambda=1$时$C_{M,AM}$约为$\lambda=0.1$时的2.2倍。整体上,八边形截面相对于其他截面所受倾覆力矩较大,各类截面在不同λ下力矩系数均存在不同程度的差异,采用缩尺比试验和数值模拟时存在尺寸效应。

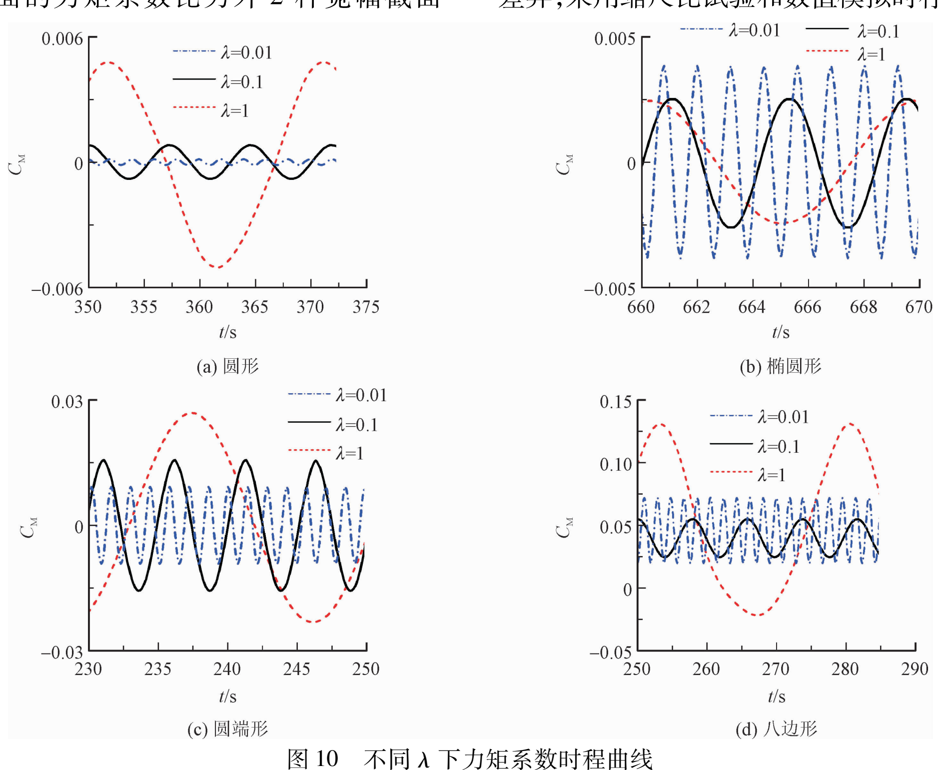
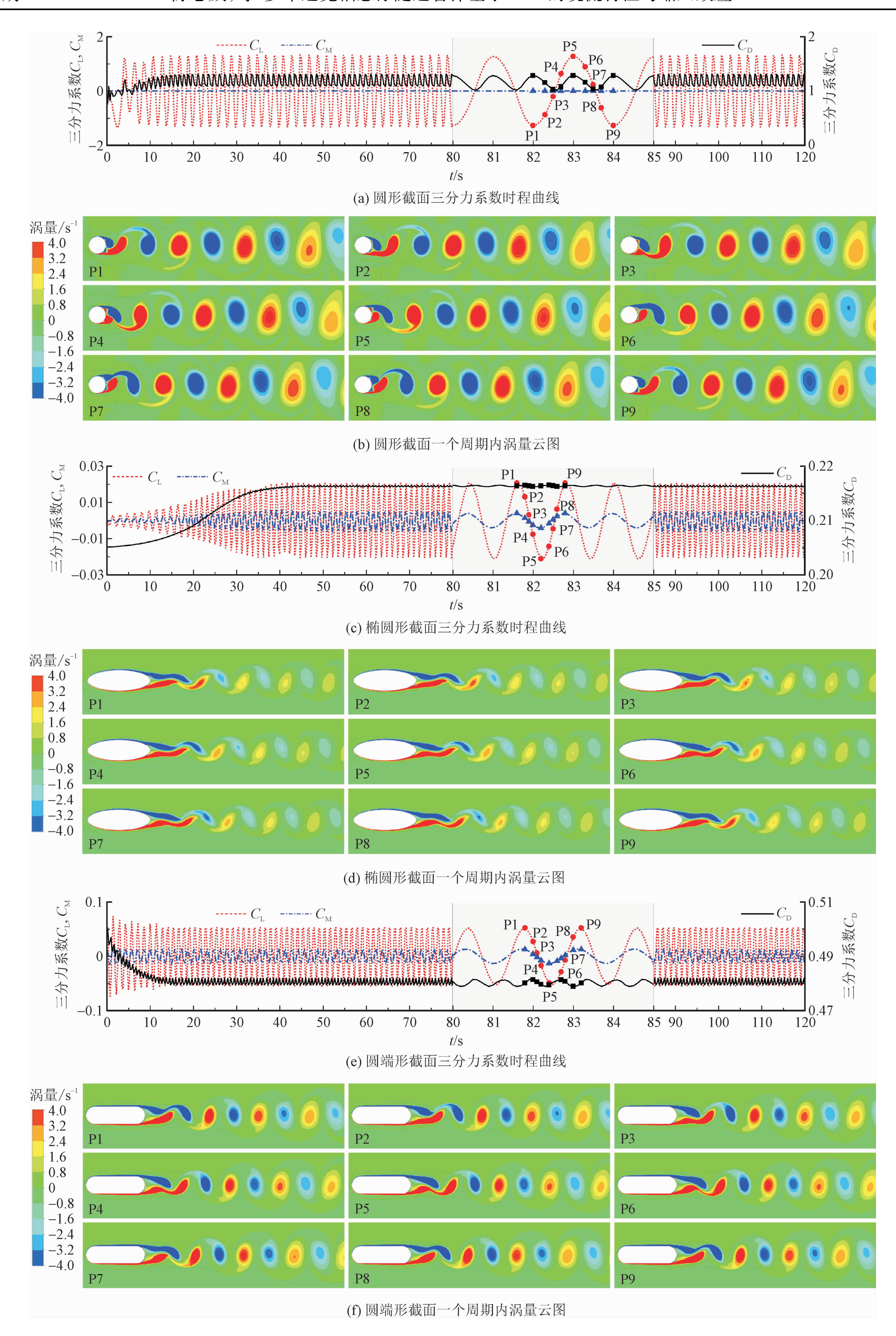


图10 不同λ下力矩系数时程曲线

Fig. 10 Time history of torque coefficient with different λ

2.5 涡量云图对比

图11给出了典型参数($\lambda=0.01$,$U_1=0.3$ m/s)下圆形、椭圆形和圆端形截面的三分力系数全过程时程曲线,在此基础上进行局部放大并给出了一个稳定周期内多个时间点(P1~P9)的涡量云图。与之对应,图12则给出了八边形截面在3种缩尺比下$\lambda=0.01$、0.1、1(对应流速0.3、0.95、3.0 m/s)对应的三分力系数时程曲线与一个周期内的涡量云图。从图11~图12中稳定之后的三分力系数可以看出,$C_{L,AM}$、$\overline{C}_D$、$C_{M,AM}$与图5~图10中系数分布规律一致,圆形截面与各类宽幅截面的卡门涡街规律十分明显,各类截面的三分力系数不同时,涡的脱落位置与尾涡脱落的强度也存在差异。一般说来,绕流阻力包括摩擦阻力和压差阻力[35],前者与黏性系数、绕流物几何形状有关,绕流物体沿流向尺寸越大摩擦阻力也越大。压差阻力由边界层分离与前后压强差产生,分离点越靠后绕流体前后压强差越小,压差阻力也越小。由于悬浮隧道管体为钝体截面,绕流阻力主要为压差阻力,与尾流脱涡、涡量分离息息相关。三分力系数曲线经历一段时间后呈现稳定的周期性变化规律,升力系数变化一个周期即产生一个涡的脱落,同时产生2个周期的阻力系数变化。对比图11(b)、图11(d)、图11(f)中3类截面与图12(b)中八边形截面在一个周期内的涡量云图分布,当$\lambda=0.01$时圆形截面尾涡强度最大,分离点最靠前,椭圆形截面尾涡强度最小,分离点最靠后,八边形、圆端形截面的尾涡强度介于圆形截面和椭圆形截面之间。因此,圆形截面的阻力系数最大,椭圆截面最小,这与圆形、八边形、圆端形、椭圆形的阻力系数均值分别为1.21、0.68、0.48、0.23(图7a)一致。这表明尾涡脱落对结构所受三分力有一定影响,观察尾涡分布特点可以判断三分力系数分布情况。



(a) 圆形截面三分力系数时程曲线

(b) 圆形截面一个周期内涡量云图

(c) 椭圆形截面三分力系数时程曲线

(d) 椭圆形截面一个周期内涡量云图

(e) 圆端形截面三分力系数时程曲线

(f) 圆端形截面一个周期内涡量云图

图 11　不同截面形状的三分力系数时程曲线与一个周期内涡量云图($\lambda=0.01$)

Fig. 11　Time history of three coefficients for different sections and periodic vorticity cloud diagram ($\lambda=0.01$)

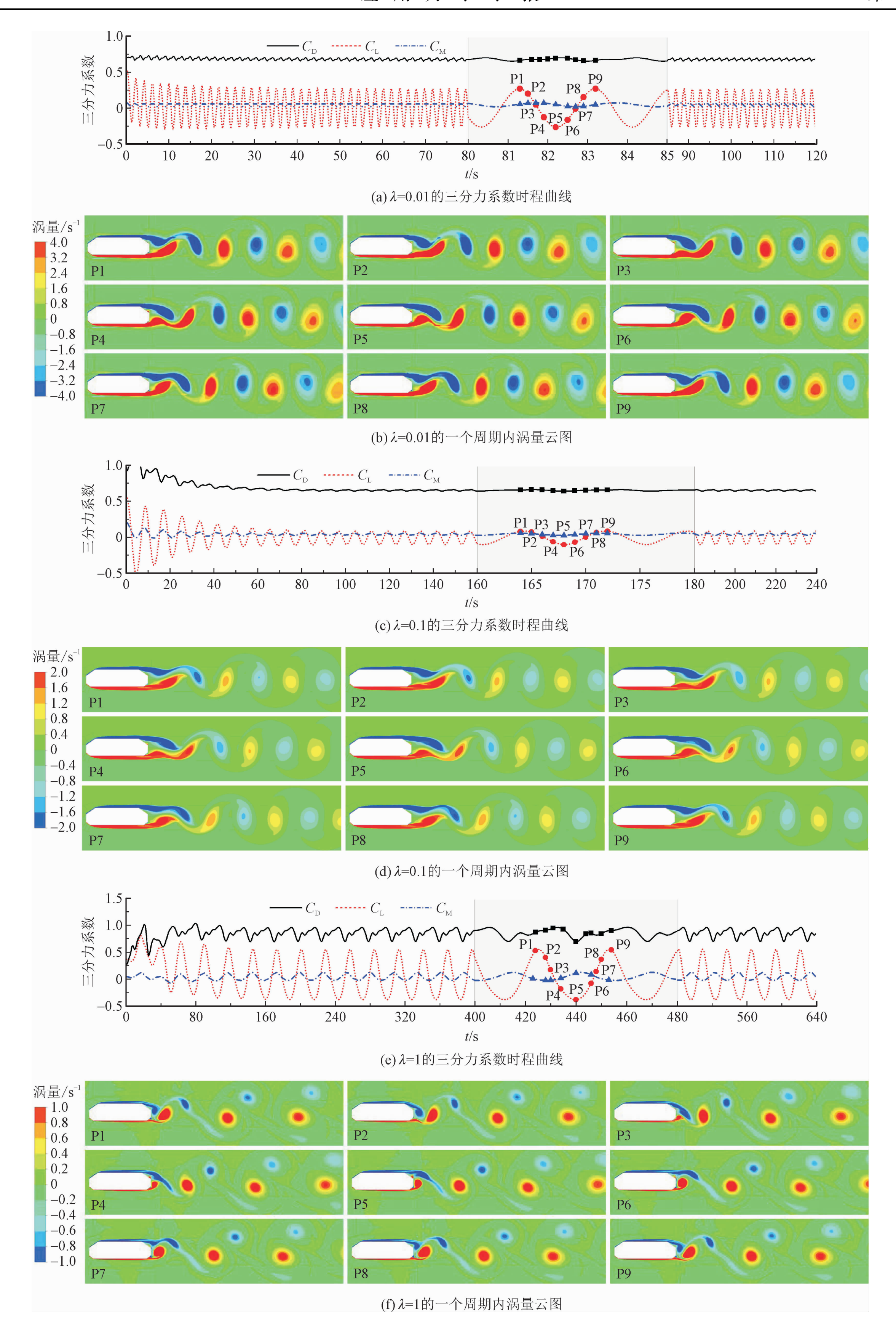


图 12 八边形截面不同 λ 的三分力系数时程曲线与一个周期内涡量云图

Fig. 12 Time history of three coefficients of octagonal section for different λ and periodic vorticity cloud diagram

由图 12 所示的八边形截面在 3 种 λ 下的时程曲线与涡量云图可知,不同的 λ 对应的八边形截面尾涡脱落非常明显,当 λ 增大时尾涡强度降低且涡旋脱落没有统一的规律。这说明不同缩尺比例下的尾涡脱落规律存在较大的差别,当使用缩尺方法研究八边形结构的绕流特性时存在一定的尺寸效应,会带来结果上的差值。

3　结　论

基于 CFD 软件 Fluent 对多车道宽幅悬浮隧道截面在不同缩尺比下的绕流特性进行了数值模拟,得到了三分力系数、涡量云图的规律,所得结论如下。

1)椭圆形、圆端形和八边形宽幅截面三分力系数的稳定性较好,当流速增大时三分力系数变化不大。$\lambda=0.1$ 时,圆形截面阻力系数、升力系数随着流速的增大明显减小。

2)圆形截面升力系数幅值 $C_{L,AM}$ 大于宽幅形截面;3 种宽幅截面中,不同缩尺比对应 $C_{L,AM}$ 的大小均为八边形 > 圆端形 > 椭圆形;椭圆形截面脱涡频率最大即 St 数最大,八边形截面脱涡频率最小即 St 数最小。

3)3 种宽幅截面对应的阻力系数均值 $\overline{C}_D$ 为八边形 > 圆端形 > 椭圆形,宽幅截面形式在不同缩尺比之间阻力系数的尺寸效应明显。

4)八边形截面力矩系数幅值 $C_{M,AM}$ 大于其余 3 种截面,且不同 λ 值时差异明显,对应的尺寸效应显著。其原因在于"宽幅"的特点导致升力、阻力的合力与形心不一致而产生扭矩,八边形截面由于上、下不对称而更加明显。

5)各类宽幅截面在不同缩尺比之间的三分力系数存在不同程度的差异,在进行数值研究和模型试验时需考虑尺寸效应带来的影响。

6)圆形截面尾涡强度最大,分离点最靠前,对应阻力系数最大;椭圆形截面尾涡强度最小,分离点最靠后,对应阻力系数最小;八边形、圆端形截面的尾涡强度介于这两类截面之间。

参考文献:

[1] ØSTLID H. When is SFT competitive? [J]. Procedia engineering, 2010,4:3-11.

[2] MARTIRE G, FAGGIANO B, MAZZOLANI F M. Compared cost evaluation among traditional versus innovative strait crossing solutions[J]. Procedia engineering, 2010,4:293-301.

[3] 项贻强,陈政阳,杨赢. 悬浮隧道动力响应分析方法及模拟的研究进展[J]. 中国公路学报,2017,30(1):69-76.
XIANG Yiqiang, CHEN Zhengyang, YANG Ying. Research development of method and simulation for analyzing dynamic response of submerged floating tunnel[J]. China journal of highway and transport, 2017,30(1):69-76(in Chinese).

[4] 丁浩,程亮,李科. 悬浮隧道结构动力响应研究进展与展望[J]. 隧道建设(中英文),2019,39(6):901-912.
DING Hao, CHENG Liang, LI Ke. Research progress and prospect on dynamic response of SFT structures[J]. Tunnel construction, 2019,39(6):901-912(in Chinese).

[5] 周泰翔,贾军波,邓扬,等. 悬浮隧道结构体系与动力响应研究进展[J]. 工程力学,2022,39(4):15-28.
ZHOU Taixiang, JIA Junbo, DENG Yang, et al. Recent developments in the structural system and dynamic response of submerged floating tunnel[J]. Engineering mechanics, 2022,39(4):15-28(in Chinese).

[6] 林巍,尹海卿,刘凌锋,等. 悬浮隧道实验工程研究[J]. 中国港湾建设,2021,41(3):41-49.
LIN Wei, YIN Haiqing, LIU Lingfeng, et al. Experimental engineering research on submerged floating tunnel[J]. China harbour engineering, 2021,41(3):41-49(in Chinese).

[7] ZHANG H Q, YANG Z W, LI J Z, et al. A global review for the hydrodynamic response investigation method of submerged floating tunnels[J]. Ocean engineering, 2021,225:108825.

[8] AADNESEN L, JAKOBSEN B, MOKSNES J. The case for floating submerged tunnels[J]. Tunnels & tunnelling international, 1999, 31(6):32-34.

[9] 范泽旭,袁勇,何任飞,等. 固定支承式悬浮隧道在洋流涡激作用下的动力响应研究[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(3):653-659.
FAN Zexu, YUAN Yong, HE Renfei, et al. Dynamic response analysis of submerged floating tunnel supported on columns in vortex-induced vibration[J]. Journal of railway science and engineering, 2020,17(3):653-659(in Chinese).

[10] 叶腾超. 定常流状态下悬浮隧道结构外型与涡激响应理论研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2018.

[11] 武玉涛,任华堂,夏建新. 圆柱绕流研究进展及展望[J]. 水运工程,2017(2):19-26.
WU Yutao, REN Huatang, XIA Jianxin. Research progress and prospects on flow across cylinder[J]. Port & waterway engineering, 2017(2):19-26(in Chinese).

[12] KIM S, WILSON P A, CHEN Z M. Large-eddy simulation of the turbulent near wake behind a circular cylinder: Reynolds number effect[J]. Applied ocean research, 2015, 49:1-8.

[13] JIANG H Y, CHENG L. Strouhal-reynolds number relationship for flow past a circular cylinder[J]. Journal of fluid mechanics, 2017, 832:170-188.

[14] ALJURE D E, LEHMKHUL O, RODRÍGUEZ I, et al. Three dimensionality in the wake of the flow around a circular cylinder at Reynolds number 5 000[J]. Computers & fluids, 2017, 147:102-118.

[15] 梁圣召,周军伟,梅蕾. 不同工况下有限长圆柱绕流实验测量及分析[J]. 舰船科学技术,2021,43(11):19-24.
LIANG Shengzhao, ZHOU Junwei, MEI Lei. Experiments and numerical simulations of the three-dimensional flow around a finite-length circular cylinder[J]. Ship science and technology, 2021, 43(11):19-24(in Chinese).

[16] 陈松涛,赵伟文,万德成,等. 带自由液面有限长圆柱绕流数值模拟[J]. 中国舰船研究,2022,17(1):91-98.
CHEN Songtao, ZHAO Weiwen, WAN Decheng, et al. Numerical simulation of flows around a finite-length cylinder with free surface [J]. Chinese journal of ship research, 2022, 17(1):91-98(in Chinese).

[17] 高洋洋,张演明,刘彩,等. 不同雷诺数下倾斜圆柱绕流三维数值模拟研究[J]. 海洋工程,2020,38(1):86-100.
GAO Yangyang, ZHANG Yanming, LIU Cai, et al. Three-dimensional numerical simulation on flow past an inclined circular cylinder at different Reynolds numbers[J]. The ocean engineering, 2020, 38(1):86-100(in Chinese).

[18] 刘闯,黄剑峰,邵晨. 基于 LBM-LES 的三维串列多圆柱绕流尾涡结构研究[J]. 应用力学学报,2022,39(1):186-194.
LIU Chuang, HUANG Jianfeng, SHAO Chen. Research on wake structure of three-dimensional tandem multi-cylinder flow based on LBM-LES[J]. Chinese journal of applied mechanics, 2022, 39(1):186-194(in Chinese).

[19] 李聪洲,张新曙,胡晓峰,等. 高雷诺数下多柱绕流特性研究[J]. 力学学报,2018,50(2):233-243.
LI Congzhou, ZHANG Xinshu, HU Xiaofeng, et al. The study of flow past multiple cylinders at high Reynolds numbers[J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2018, 50(2):233-243(in Chinese).

[20] 王长春. 水中悬浮隧道与洋流耦合作用的模型试验[D]. 成都:西南交通大学,2005.

[21] 秦银刚,周晓军. 洋流作用下悬浮隧道动力学行为试验研究[J]. 公路交通科技,2009,26(12):69-72.
QIN Yingang, ZHOU Xiaojun. Experimental study of dynamic behavior of submerged floating tunnel under current effect[J]. Journal of highway and transportation research and development, 2009, 26(12):69-72(in Chinese).

[22] 王广地,周晓军,高波. 均匀流作用下悬浮隧道管段水动力参数分析[J]. 四川大学学报(工程科学版),2009,41(2):96-102.
WANG Guangdi, ZHOU Xiaojun, GAO Bo. Analysis of hydrodynamic coefficients of the submerged floating tunnel subjected to homogeneous flow[J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2009, 41(2):96-102(in Chinese).

[23] 郭晓玲,金瑞佳,刘名名,等. 水流作用下悬浮隧道耦合动力数值模拟分析[J]. 水道港口,2020,41(3):275-283.
GUO Xiaoling, JIN Ruijia, LIU Mingming, et al. Coupled numerical dynamic analysis of flow and submerged floating tunnel[J]. Journal of waterway and harbor, 2020, 41(3):275-283(in Chinese).

[24] 曾繁旭,陈进,林巍. 悬浮隧道特征横断面过水特性研究 4:绕流场特征[J]. 中国港湾建设,2020,40(2):76-81.
ZENG Fanxu, CHEN Jin, LIN Wei. Submerged floating tunnel conceptualized cross-section hydrodynamic characteristic study 4: flow field characteristics[J]. China harbour engineering, 2020, 40(2):76-81(in Chinese).

[25] 李勤熙. 波-流耦合作用下悬浮隧道关键参数数值仿真与物理试验[D]. 重庆:重庆交通大学,2019.

[26] 周云龙,郭婷婷. 高等流体力学[M]. 北京:中国电力出版社,2008.

[27] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA journal, 1994, 32(8):1598-1605.

[28] FRANKE J, FRANK W. Large eddy simulation of the flow past a circular cylinder at $Re_D = 3\ 900$[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2002, 90(10):1191-1206.

[29] 詹昊,李万平,方秦汉,等. 不同雷诺数下圆柱绕流仿真计算[J]. 武汉理工大学学报,2008,30(12):129-132.
ZHAN Hao, LI Wanping, FANG Qinhan, et al. Numerical simulation of the flow around a circular cylinder at varies Reynolds number[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 30(12):129-132(in Chinese).

[30] CANTWELL B J. A flying hot wire study of the turbulent near wake of a circular cylinder at a Reynolds number of 140 000 show affiliations[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 1976.

[31] SCHEWE G. On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds numbers [J]. Journal of fluid mechanics,1983,133:265-285.
[32] 程友良,汪辉,赵洪嵩. 超临界雷诺数下旋转圆柱绕流的三维大涡[J]. 可再生能源,2017,35(7):1094-1100.
CHENG Youliang, WANG Hui, ZHAO Hongsong. Three-dimensional large eddy simulation of flow around a rotating circular cylinder under supercritical Reynolds number[J]. Renewable energy resources,2017,35(7):1094-1100(in Chinese).
[33] 刘二朋,陈威,林永水,等. 不同雷诺数下二维椭圆柱绕流的数值模拟研究[J]. 应用力学学报,2021,38(5):2025-2031.
LIU Erpeng, CHEN Wei, LIN Yongshui, et al. Numerical simulation of flow around a two-dimensional elliptical cylinder with different Reynolds numbers [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2021,38(5):2025-2031(in Chinese).
[34] SCHLICHING H. Boundary-layer theory [M]. New York: MC Graw-Hill,1979.
[35] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

(编辑　李坤璐)

